

Samuli Pokela

# AJONEUVOJEN TASAUSPYÖRÄSTÖT

Toiminta, käyttökohteet ja kehityssuunnat

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Samuli Pokela : Ajoneuvojen tasauspyörästöt – toiminta, käyttökohteet ja kehityssuunnat  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Toukokuu 2019

---

Tämän työn tavoitteena oli selvittää ajoneuvojen tasauspyörästöjen toimintaa, käyttökohteita ja kehitystä. Työssä käytiin lyhyesti läpi tasauspyörästön kehityksen historiaa ja perusteellisemmin erilaisia tasauspyörästöjen rakenteita. Työssä selvitettiin myös tasauspyörästöjen mahdollisia kehityssuuntia.

Tasauspyörästön perusrakenne ja toiminta on pysynyt samana jo 1800-luvun alusta lähtien, jolloin ranskalainen Onésiphore Pecqueur käytti keksimäänsä tasauspyörästöä höyryvoimalla kulkeneessa ajoneuvossaan. Työssä tutkittiin tasauspyörästöön sittemmin tapahtuneita edistyksiä ja huomattiin, että tasauspyörästön perusrakenteeseen on tapahtunut hyvin vähän muutoksia sen keksimisestä lähtien.

Monet autovalmistajat ovat tehneet omat, hieman erilaiset ratkaisunsa tasauspyörästöihinsä ja niiden sijoitteluun auton muun voimansiirron mukaan. Yleisin käytössä oleva tasauspyörästö on avoin tasauspyörästö, jonka käyttöä puoltaa sen yksinkertainen ja siten kustannustehokas rakenne. Sen rakenne sopii käytettäväksi myös ajoneuvoissa nykyisin olevien ajonvakautus- ja luistonestojärjestelmien kanssa. Nelivetoisissa ajoneuvoissa monet valmistajat käyttävät kuitenkin esimerkiksi sähköhydraulisesti kytkettävää kytkintä tai Torsen-tasauspyörästöä akseleiden välissä.

Tasauspyörästöjen rakenne on pysynyt pitkään muuttumattomana. Joitakin prototyyppias-teella olevia rakenteita on ollut kehityksessä, kuten Schaefflerin kevyt tasauspyörästö, joka käyttää sisäisten kartiohammaspyörien sijasta planeettapyörästöä. Tällaisella rakenteella saadaan huomattavia säästöjä tasauspyörästön massassa sekä laakerivälissä. Tällä hetkellä ei kuitenkaan näytä siltä, että tasauspyörästön perusrakenteessa olisi tapahtumassa suuria muutoksia, vaan normaali avoin tasauspyörästö jatkaa suosittuna ratkaisuna.

Avainsanat: Ajoneuvojen tasauspyörästöt, vetopyörästö, rajoitetun luiston tasauspyörästö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Samuli Pokela : Automotive Differentials – Operation, applications and development  
Bachelor's Thesis  
Tampere University  
Mechanical Engineering  
May 2019

---

The objective of the thesis was to research the operation, applications and development of automotive differentials.

Keywords: Automotive differentials, final drive, limited slip differential

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TASAUSPYÖRÄSTÖJEN RAKENTEET .....	2
2.1 Tasauspyörästön kehitys ja rakenne .....	2
2.2 Lukittavat tasauspyörästöt.....	5
2.3 Itselukittuvat tasauspyörästöt .....	6
2.3.1 Monilevykytkimiin perustuvat itselukittuvat tasauspyörästöt .....	8
2.3.2 Torsen-kierukkavaihteeseen perustuvat tasauspyörästöt.....	9
2.3.3 Viskokyttimeen perustuvat itselukittuvat tasauspyörästöt .....	11
2.4 Sähköhydrauliset rajoitetun luiston tasauspyörästöt.....	14
3. TASAUSPYÖRÄSTÖJEN KÄYTTÖKOHTEET .....	16
3.1 Etu- ja takavetoautojen tasauspyörästöt.....	16
3.2 Nelivetoautojen tasauspyörästöt .....	18
4. TASAUSPYÖRÄSTÖJEN KEHITYSSUUNTIA.....	21
5. YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET .....	26

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	Jäykän akselin toimintaperiaate: 1) vääntömomentin tuloakseli, 2) vetopyörästä ja 3) vetoakseli (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 227). ....	2
<b>Kuva 2.</b>	Onésiphore Pecqueurin suunnitteleman tasauspyörästäön rakenne vuodelta 1827 vasemmalla (Naunheimer et al. 2011, s. 15) ja toimintaperiaate oikealla (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 229). ....	3
<b>Kuva 3.</b>	Ilmanpaineella toimiva lukitusmekanismi lukittavassa tasauspyörästäössä (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 236). ....	6
<b>Kuva 4.</b>	Kiertymismomentin muodostuminen renkaiden erisuuruuksista vääntömomenteista. ....	7
<b>Kuva 5.</b>	Monilevykytkimiin perustuva rajoitetun luiston tasauspyörästäö: 1) tasauspyörästäön kotelo, 2) tasauspyörästäön akseli, 3) paineasetelmat, 4) ulommat kitkalevyt, 5) sisemmät kitkalevyt, 6) vetoakseleiden kartiohammaspyörät, 7) lautajouset ja 8) v-syvennykset (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 556). ....	8
<b>Kuva 6.</b>	Torsen-kierukkavaihteeseen perustuva itselukittuva tasauspyörästäö (Genta & Morello 2009, s. 521). ....	10
<b>Kuva 7.</b>	Viskokytkimeen perustuvan itselukittuvan tasauspyörästäön rakenne (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 241). ....	12
<b>Kuva 8.</b>	Viskokytkimen ja monilevykytkimen välittämä vääntömomentti akseleiden pyörimisnopeuseron mukaan (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 241). ....	13
<b>Kuva 9.</b>	Sähköhydraulisesti toimivan rajoitetun luiston tasauspyörästäön yksityiskohtainen rakenne (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 263). ....	14
<b>Kuva 10.</b>	Erillisjousituksellisen, takavetoisen auton (Mercedes) taka-akselin tasauspyörästäön poikkileikkaus (perustuu lähteeseen Genta & Morello 2009, s. 506). ....	16
<b>Kuva 11.</b>	Poikittaismoottorillisen etuvetoauton (FIAT) vaihdelaatikkoon integroidun tasauspyörästäön poikkileikkaus vasemmalla ja pitkittäismoottorillisen etuvetoauton (Audi) tasauspyörästäökonfiguraatio oikealla (perustuu lähteeseen Genta & Morello 2009, s. 508). ....	18
<b>Kuva 12.</b>	Audi Quattron vaihdelaatikko: 1) vaihdelaatikon käytettävä akseli, 2) tasauspyörästäön kotelo, 3) planeettapyörä, 4) kierukkapyörä, 5) etuakselin pääakseli, 6) etutasauspyörästäö ja 7) taka-akselille menevän akselin laippa (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 562). ....	19
<b>Kuva 13.</b>	Volkswagenin nelivetojärjestelmän, "4Motion":in, rakenne taka-akselilla (Naunheimer et al. 2011, s. 565). ....	20
<b>Kuva 14.</b>	Schaefflerin kehittämän kevyen tasauspyörästäön variantti suorahampaisilla hammaspyörillä (Biermann et al. 2013, s. 211). ....	22

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABS	engl. Anti-lock braking system, lukkiutumattomat jarrut
CGS	engl. centimetre-gram-second system of units, mittayksikköjärjestelmä, joka käyttää senttimetriä pituuden yksikkönä, grammaa massan yksikkönä sekä sekuntia ajan yksikkönä
cSt	engl. centistoke, CGS-järjestelmän kinemaattisen viskositeetin mittayksikkö, vastaava SI-yksikkö $\text{mm}^2/\text{s}$
ea.	ennen ajanlaskun alkua
FZG	saks. Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau, tutkimuslaitos
LSD	engl. Limited Slip Differential, rajoitetun luiston tasauspyörästö
SI-järjestelmä	ransk. Système international d'unités, kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä
$T_1$	Tasauspyörästöön tuleva vääntömomentti
$T_{oikea}$	Tasauspyörästöstä lähtevä vääntömomentti oikealle vetoakselille
$T_{vasen}$	Tasauspyörästöstä lähtevä vääntömomentti vasemmalle vetoakselille

# 1. JOHDANTO

Ajoneuvoissa nykyäänkin käytettävän tasauspyörästäön rakenne keksittiin 1800-luvun alussa, jolloin ensimmäisten höyrykoneita käyttäneiden ajoneuvojen kehityksen ja valmistuksen yhteydessä huomattiin, että ajoneuvon ajo-ominaisuudet olivat huonot, kun moottorin vääntömomentti ohjattiin joko vain yhdelle renkaalle tai jäykällä akselilla molemmille renkaalle (Naunheimer et al. 2011, s. 15–16; Nunney 1998, katso Mihailidis & Nerantzis 2013). Ongelma ilmenee erityisesti ajoneuvon kääntyessä esimerkiksi mutkassa kulkiessaan, jolloin akselin renkaat kulkevat eri kääntöympyrän säteillä ja siten eri nopeuksilla.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan, miten tasauspyörästö ratkaisee edellä mainitun ongelman, mitä hyötyä tasauspyörästäön käytöstä on, ja tuoko tasauspyörästäön käyttö joitakin haasteita ajoneuvon käyttäytymiseen. Luvussa 2 käydään läpi yleisimpiä tasauspyörästäöjen rakenteita ja niiden johdannaisia, kuten itselukittuvia tasauspyörästäöjä, joilla joitain normaalin, avoimen tasauspyörästäön ongelmista yritetään ratkaista. Yksi näistä ongelmista on esimerkiksi ajoneuvon liikkeellelähtö vaihtelevissa pito-olosuhteissa.

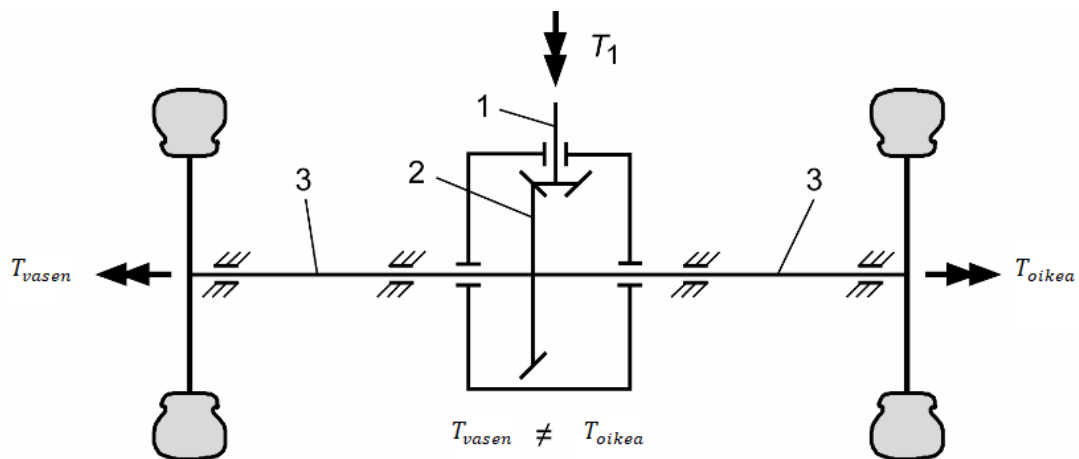
Tasauspyörästäön eri rakenteiden jälkeen käydään läpi sen käyttökohteita ja erilaisia integrointiratkaisuja etu-, taka- ja nelivetoisiin ajoneuvoihin. Luvussa 3 esitetään näiden ratkaisujen rakenteita ja selvitetään lyhyesti, millä perusteella eri tasauspyörästäöjä ja sen lukittavia tai itselukittuvia versioita käytetään.

Luvussa 4 tutkitaan, mihin tasauspyörästäön kehityksessä on viime vuosina keskitytty ja selvitetään, onko olemassa joitain vaihtoehtoisia rakenteita tai mekanismeja tasauspyörästäön tilalle. Tämän lisäksi tutkitaan, onko tasauspyörästäölle tarvetta tulevaisuuden ajoneuvoissa, kuten nopeasti suosiotaan nostavissa sähköautoissa ja niiden voimansiirrossa. Lopuksi luvussa 5 työtä ja sen tuloksia vedetään yhteen.

## 2. TASAUSPYÖRÄSTÖJEN RAKENTEET

### 2.1 Tasauspyörästäön kehitys ja rakenne

Tasauspyörästäön tarpeellisuus tuli esille ensimmäisten polttomoottorillisten henkilöautojen kehityksessä ja valmistuksessa. Jotta auton hallittavuus ja pito-ominaisuudet olisivat hyväksyttävällä tasolla, on auton polttomoottorin kehittämä energia ja siis vääntömomentti välitettävä vähintään yhdelle akselille (Naunheimer et al. 2011, s. 227). Tämän jälkeen kyseinen vääntömomentti pitää välittää akselilla oleville renkailla, oikeanpuoleiselle ja vasemmanpuoleiselle renkaalle. Yksinkertaisin tapa on käyttää yhtä jäykkää vetoakselia, joka yhdistää molemmat renkaat (kuva 1).



**Kuva 1.** Jäykän akselin toimintaperiaate: 1) vääntömomentin tuloakseli, 2) vetopyörästäö ja 3) vetoakseli (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 227).

Kuvassa 1 esitetyssä rakenteessa vääntömomentti  $T_1$  välittyy moottorilta vaihdelaatikon kautta akselia pitkin (kuva 1 numero 1), joka on auton kulkusuunnan suuntainen. Tämä vääntömomentti täytyy muuttaa auton kulkusuuntaan nähden poikittaiseksi, jotta se voidaan välittää akselilla oleville renkailla jäykän vetoakselin (3) avulla. Tämä tehdään yleensä vetopyörästäöä (2) käyttäen. Autoissa, joissa vetopyörästäö sijaitsee taka-akselilla, voidaan vetopyörästäöä kutsua myös perävälitykseksi. Huomattavaa on myös se, että jäykkää akselia käytettäessä vääntömomentti ei ole molemmilla renkailla sama,  $T_{vasen} \neq T_{oikea}$ , vaan kumpikin rengas saa vääntömomentin renkaan pidon perusteella.

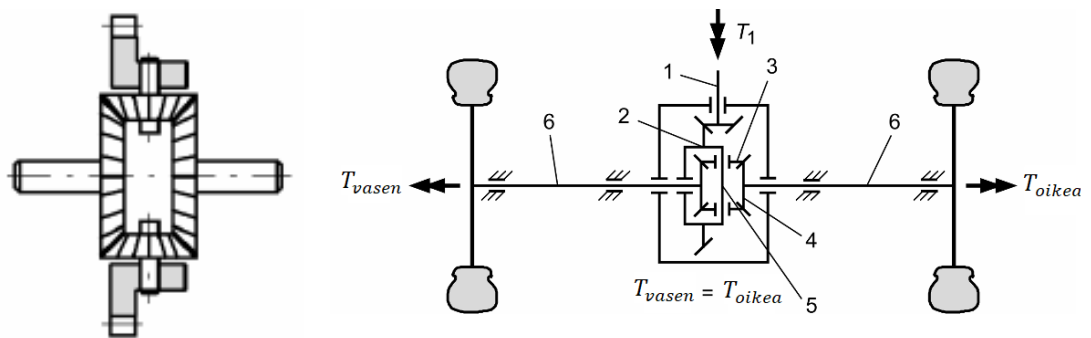
Jäykän, molemmat renkaat yhdistävän akselin käyttö on kuitenkin ongelmallista, koska auton kääntyessä kääntöympyrän sisäpuoliset renkaat kulkevat lyhyemmän matkan kuin ulkopuoliset. Tämä tarkoittaa myös sitä, että sisäpuolisten renkaiden pyörimisnopeus on pienempi kuin ulkopuolisten renkaiden. Jäykkää akselia käytettäessä tämä ei kuitenkaan



ole mahdollista, vaan renkaat pyörivät aina samalla pyörimisnopeudella. Tällöin kääntyminen aiheuttaa ylimääräistä kulumista ja kuormitusta voimansiirron komponenteille sekä renkaille. (Naunheimer et al. 2011, s. 227)

Ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan siis mekanismi, jolla vaihdelaatikolta tuleva pyörimisnopeus voidaan jakaa kahteen pyörimisnopeuskompensoituun osaan. Mekanismin täytyy myös jakaa tuleva vääntömomentti kahteen tasattuun osaan. Mekanismia, joka toteuttaa nämä vaatimukset, kutsutaan tasauspyörästäksi. Tasauspyörästää käytetään myös akseleiden välillä. Esimerkiksi nelivetoisissa henkilöautoissa eli autoissa, joissa vääntömomentti välitetään molemmille sekä etu- että taka-akselille, akseleiden välillä olevaa tasauspyörästää kutsutaan jakovaihteeksi tai keskitasauspyörästäksi (Genta & Morello 2009, s. 505).

Historiallisia todisteita ensimmäisestä alkeellisesta tasauspyörästä on löydetty jo vuoteen 80 eaa. ajoitetusta Antikythera-laitteesta (de Price 1974, katso Mihailidis & Nerantzis 2013, s. 125). Laitteessa tasauspyörästää oli käytetty muuntamaan yhdeltä akselilta tuleva vääntömomentti kahdelle erisuuntaiselle akselille. Ajoneuvoissa sittemmin käytettävän tasauspyörästä on kuitenkin sanottu olevan ranskalaisen Onésiphore Pecqueurin paljon myöhemmin keksimä. Pecqueur patentoi vuonna 1828 höyrykulkuneuvon, joka käytti hänen aiemmin vuonna 1827 keksimäänsä tasauspyörästä ajoneuvon käytettävällä akselilla (Naunheimer et al. 2011, s. 16; Nunney 1998, katso Mihailidis & Nerantzis 2013, s. 125). Pecqueurin tasauspyörästäön rakenne ja sen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.



**Kuva 2.** Onésiphore Pecqueurin suunnitteleman tasauspyörästäön rakenne vuodelta 1827 vasemmalla (Naunheimer et al. 2011, s. 15) ja toimintaperiaate oikealla (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 229).

Pecqueurin keksimän tasauspyörästäön rakennetta voidaan kutsua myös avoimeksi tasauspyörästäksi. Kuten kuvassa 2 oikealla puolella on esitetty, avoimessa tasauspyörästäössä ei ole vain yhtä jäykkää vetoakselia, joka yhdistää molemmat akselin renkaista vaan molemmille renkaille on oma erillinen vetoakselinsa (kuva 2 numero 6). Avoimes-

sakin tasauspyörästössä moottorilta tuleva vääntömomentti  $T_1$  tulee ajoneuvon pituussuuntaisesti vetopyörästöön (1 ja 2), jossa se muutetaan poikittaiseksi. Nyt vääntömomentti kuitenkin ohjataan tasauspyörästön kuoreen (2), josta se välittyy tasauspyörästön ylä- ja alapuolisten kartiohammaspyörien (3) akseluihin (5). Kartiohammaspyörät välittävät vääntömomentin sivuilla oleville kartiohammaspyörille (4), jotka on yhdistetty renkaille meneviin vetoakseleihin (6). Tätä kartiohammaspyörien konfiguraatiota voidaan kutsua myös planeettapyörästöksi, jossa ylä- ja alapuoliset kartiohammaspyörät ovat planeettapyöriä ja sivuilla olevat kartiohammaspyörät planeettapyörästön keskihammaspyöriä.

Näiden neljän kartiohammaspyörän (3 ja 4) konfiguraatio siis mahdollistaa vääntömomentin jakamisen molemmille puolille tasaisesti, jolloin vasemman ja oikean akselin vääntömomenteille pätee  $T_{vasen} = T_{oikea}$ , jossa  $T_{vasen}$  on vasemman akselin vääntömomentti ja  $T_{oikea}$  oikean akselin vääntömomentti. Sama mekanismi myös antaa toisen akselin, ja siten renkaan, pyörimisnopeuden poiketa toisen akselin pyörintänopeudesta esimerkiksi kaarteiden aikana. Nämä ovat tärkeimpiä tasauspyörästön ominaisuuksia, joilla edellä mainittuja ongelmia, kuten voimansiirron ja renkaiden kuormitusta ja kulumista, saadaan vähennettyä, ellei kokonaan poistettua. (Naunheimer et al. 2011, s. 229–230)

Avoimen tasauspyörästön käyttö ei kuitenkaan ole aina paras ratkaisu. Koska avointa tasauspyörästöä käytettäessä molemmille akselin renkaille välitettävä vääntömomentti on aina yhtä suuri, on tasauspyörästön käyttäytyminen esimerkiksi vaihtelevissa pitoolosuhteissa ongelmallista. Tilanteessa, jossa toinen rengas on pitävällä, kitkaisella pinnalla, kuten asfaltilla, ja toinen liukkaalla hyvin pienen kitkan omaavalla pinnalla, kuten jäällä, välittää tasauspyörästö pienimmän vaaditun vääntömomentin renkaiden pyörittämiseen molemmille renkaille. Koska jääpinnalla olevan renkaan pyörittämiseen tarvittava vääntömomentti on pieni ja sama vääntömomentti välitetään asfaltilla olevalle renkaalle, ei auto liiku eteenpäin vaan jää paikalleen yhden renkaan pyöriessä tyhjää jääpinnalla. Sama tilanne voi myös muodostua nelivetoisissa ajoneuvoissa, joissa renkaiden välillä käytetään avointa tasauspyörästöä ja sen lisäksi akselien välillä käytetään avointa tasauspyörästöä. Tällöin ajoneuvon liikkeelle lähdön estämiseksi riittää teoriassa toisen akselin yhdenkin renkaan pyöriminen tyhjää liukkaalla pinnalla.

Mahdollisia ratkaisuja avoimen tasauspyörästön ongelmiin ovat muun muassa (Naunheimer et al. 2011, s. 230)

- lukittava tasauspyörästö, manuaalinen ja automaattinen
- itselukittuva tasauspyörästö (kutsutaan joskus myös rajoitetun luiston tasauspyörästöksi, LSD, engl. Limited Slip Differential)
- ulkopuolisesti aktivoidut tasauspyörästön jarrut

- jokin yhdistelmä yllä olevista.

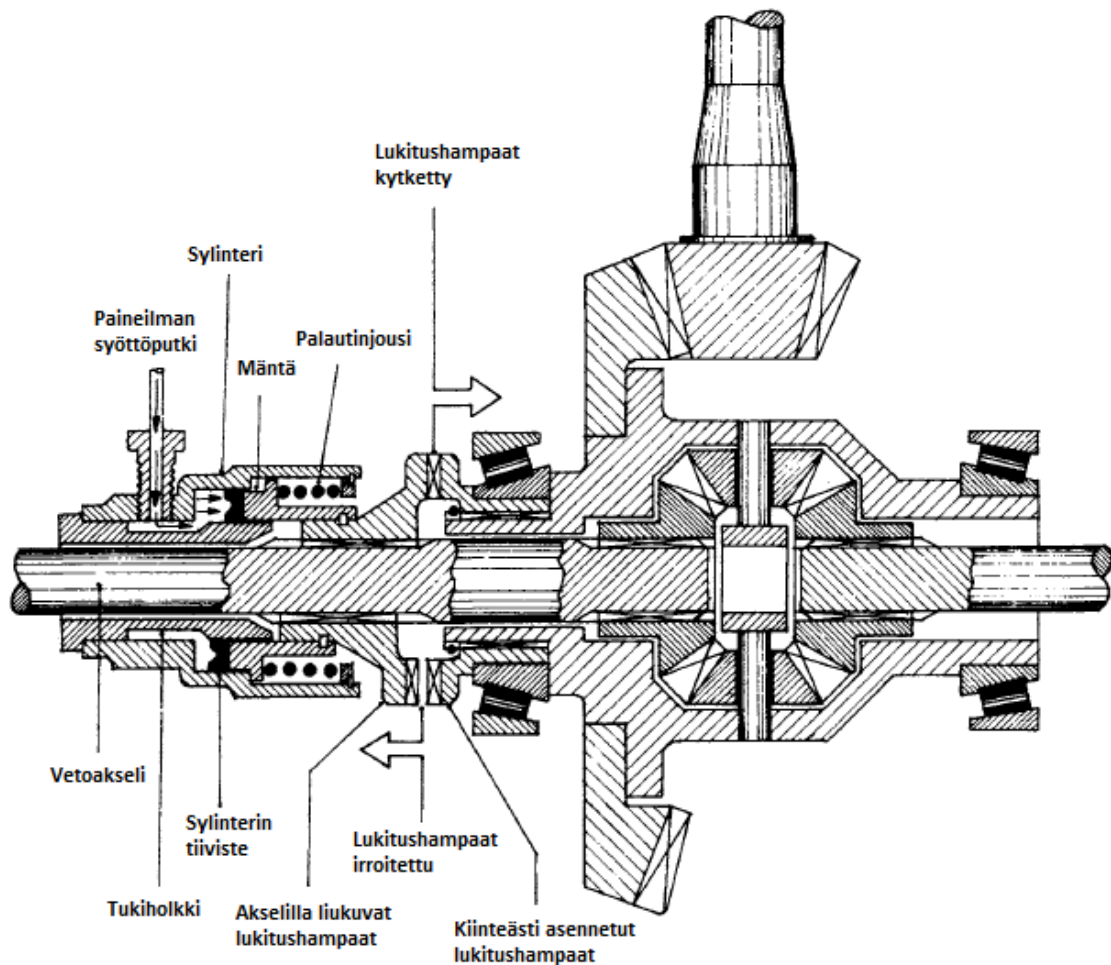
Tässä työssä keskitytään lukittaviin ja itselukittuviin tasauspyörästöihin. Näitä esitellään seuraavaksi alaluvuissa 2.2 ja 2.3.

## 2.2 Lukittavat tasauspyörästöt

Lukittavalla tasauspyörästöllä tarkoitetaan tasauspyörästöä, joka sisältää mekanismin, jolla tasauspyörästöstä lähtevät vetoakselit saadaan lukittua tasauspyörästön kuorten kanssa, jolloin molempien akseleiden pyörintänopeus on sama ja myös yhtä suuri kuin tasauspyörästön kotelolla. Koko tasauspyörästömekanismi pyörii siis tällöin yhtä aikaa, yhtenä osana. Tämä tarkoittaa myös sitä, että kaikki tasauspyörästöön tuleva vääntömomentti välitetään molemmille renkailla. Tällöin yhden renkaan menettäessä pitonsa, välittyy vääntömomentti silti vielä toiselle renkaalle, joka taas välittää vääntömomentin koskettamaansa pintaan kitkan rajoittamana.

Koska lukittu tasauspyörästö käyttäytyy kuin jäykkäakselinen vetopyörästö, on sillä myös samat ongelmat. Ajoneuvon kääntyessä sisempi rengas haluaa pyöriä hitaammin kuin ulompi rengas, jolloin lukittu tasauspyörä pakottaa toisen tai molemmat akselin renkaista hieman liukumaan eikä pyörimään pinnalla. Lukittavien tasauspyörästöjen etuna jäykkäakseliseen verrattuna on kuitenkin se, että lukitus voidaan poistaa.

Lukituksen kytkeminen päälle ja pois voi olla manuaalinen tai automaattinen prosessi (Naunheimer et al. 2011, s. 230). Manuaalisesti lukittavassa tasauspyörästössä ajoneuvon kuljettaja päättää, milloin haluaa lukita ja milloin avata tasauspyörästön. Käyttötilanteita voi olla esimerkiksi vaihtelevissa pito-olosuhteissa, kuten lumella tai mudalla ajattaessa (Heisler 2002, s. 235). Automaattisesti toimivassa järjestelmässä ajoneuvon ohjausjärjestelmä päättää valitun ajotilan ja sensoridatan mukaan tasauspyörästön lukituksesta. Yksi lukituksen kytkemismekanismeista on esitetty kuvassa 3.



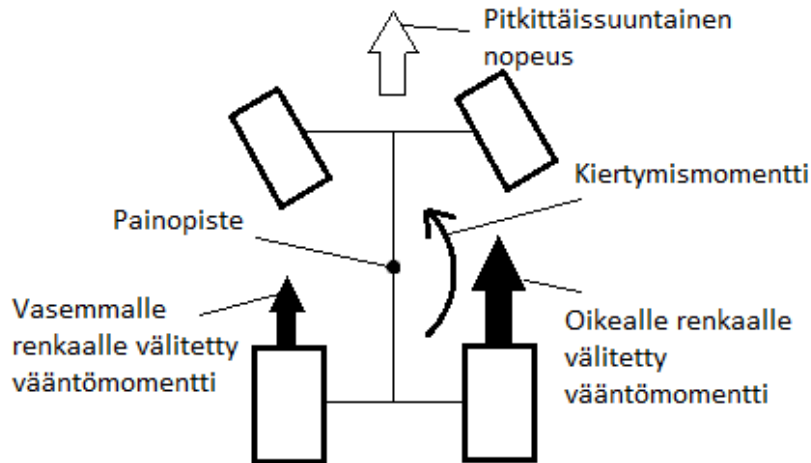
**Kuva 3.** Ilmanpaineella toimiva lukitusmekanismi lukittavassa tasauspyörästössä (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 236).

Mekanismi on toteutettu ilmanpaineen vaikutuksesta liikkuvan männän avulla, joka työntää vetoakselin urissa liikkuvat lukitushampaat kiinni tasauspyörästön rungossa oleviin hampaisiin. Lukitushampaiden toinen puoli on siis uritettu yhdessä toisen vetoakselin kanssa ja toinen on valmistettu tai asennettu kiinteästi tasauspyörästön koteloon. Kun lukitus kytketään, yhdistää nämä lukitushampaat toisen vetoakselin ja tasauspyörästön kotelon liikkeen. Tämä riittää siihen, etteivät tasauspyörästön sisältämät kartiohammaspyörät pääse pyörimään toisiinsa nähden ja koko tasauspyörästöpaketti pyörii yhtenä kappaleena.

### 2.3 Itselukittuvat tasauspyörästöt

Itselukittuvat tasauspyörästöt tunnetaan myös nimellä rajoitetun luiston tasauspyörästöt (Naunheimer et al. 2011, s. 230). Nämä tasauspyörästöt sisältävät yleensä tarkoituksella tiukan ja rajoitetun tasauspyörästötoiminnan, jolloin ne voivat välittää vääntömomenttia toiselle ulostuloakselille, ja siis renkaalle, vaikka toinen renkaista (tai akseleista) onkin

liukkaalla, vähäkitkaisella pinnalla. Tämä myös tarkoittaa avoimen tasauspyörästäön vahvuuksien, kuten kiertymismomentittoman voimanvälityksen osittaista menettämistä. Kiertymismomentilla tarkoitetaan momenttia, joka ilmenee ajoneuvon painopisteen ympäri vaakatasossa (kuva 4). Kiertymismomenttia syntyy esimerkiksi tilanteessa, jossa toinen saman akselin renkaista saa suuremman vääntömomentin kuin toinen.



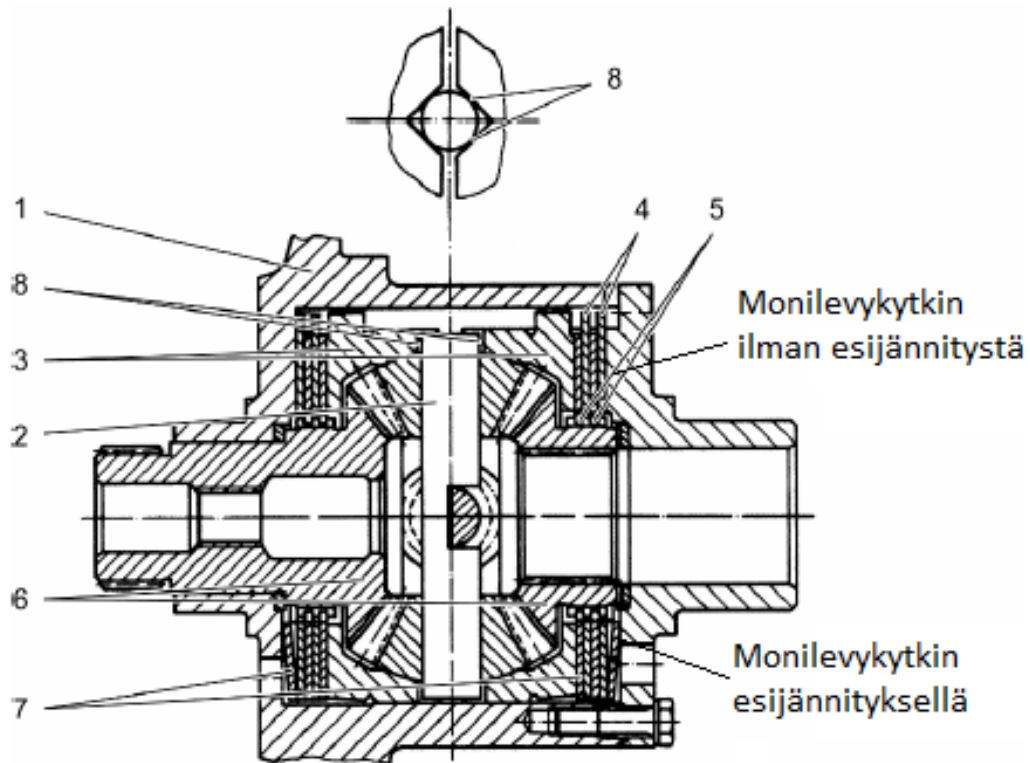
**Kuva 4.** Kiertymismomentin muodostuminen renkaiden erisuuruisista vääntömomenteista.

Itselukittuvissa tasauspyörästöissä saadaan vääntömomenttia välitettyä, vaikka yksi renkas tai akseli menettäisikin pitonsa mutta samalla vetoakselit joutuvat suuremman ja vaihtelevan kuormituksen alaisiksi kuin avoimeen tasauspyörästöön perustuvassa rakenteessa (Naunheimer et al. 2011, s. 230). Ajoneuvon kääntymisestä aiheutuva nopeusero akselin eri renkaiden välillä voi myös olla rajoitettu. Näitä itselukittuvien tasauspyörästöjen heikkouksia voidaan poistaa käyttämällä esiohjattua tasauspyörästöä, jolloin tasauspyörästöön lukitusmäärää säädetään esimerkiksi elektronisesti ohjatulla kytkimellä (Genta & Morello 2009, s. 519).

Itselukittuvat tasauspyörästöt jaetaan kahteen eri ryhmään: vääntömomentti- ja nopeusero-ohjatuksi (Naunheimer et al. 2011, s. 230). Ensiksi mainituissa lukituksen määrää ohjaa vääntömomentti, joka vaikuttaa tasauspyörästöön koteloon ja jälkimmäisenä mainitussa lukitusta ohjaa kahden akselin välinen pyörimisnopeusero yhteensä kolmesta akselistä. Käytössä on lukittavia tasauspyörästöjä, jotka käyttävät muun muassa monilevykytkimiin, kierukkavaihteeseen tai nestekytkimeen perustuvia lukitusmekanismeja.

### 2.3.1 Monilevykytkimiin perustuvat itselukittuvat tasauspyörästöt

Monilevykytkimiin perustuvien tasauspyörästöjen lukot omaavat yleensä kaksi kitkalevy-pakkaa (Naunheimer et al. 2011, s. 556). Nämä levypakat ovat symmetrisesti ja akseli-kohtaisesti asennettuna tasauspyörästön kotelon sisään (kuva 5). Levypakkojen itselukitusmekanismi perustuu sekä tasauspyörästön kuormitukseen, että levypakkojen esijännitykseen, joka syntyy lautasjousien avulla.



**Kuva 5.** Monilevykytkimiin perustuva rajoitetun luiston tasauspyörästö: 1) tasauspyörästön kotelo, 2) tasauspyörästön akseli, 3) paineasetelmat, 4) ulommat kitkalevyt, 5) sisemmät kitkalevyt, 6) vetoakseleiden kartiohammaspyörät, 7) lautasjouset ja 8) v-syvennykset (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 556).

Kitkalevypakkojen lukitukseen vaikuttavat komponentit voidaan jakaa kolmeen eri tasoon, pienimmästä lukituksesta suurimpaan (Heisler 2002, s. 238):

1. Lautasjousien jännitys
2. Kartiohammaspyörästä syntyvä erkanemisvoima
3. V-syvennyksessä tapahtuva kiilavoima

Lautasjousia käytetään, jos halutaan kitkalevypakkoihin esijännitystä. Tällöin lautasjousien aiheuttama voima kohdistuu kitkalevyihin, ja mahdollistaa tasauspyörästön lukituksen ilman siihen kohdistuvaa vääntömomenttia. Todellisuudessa esijännitykset eivät

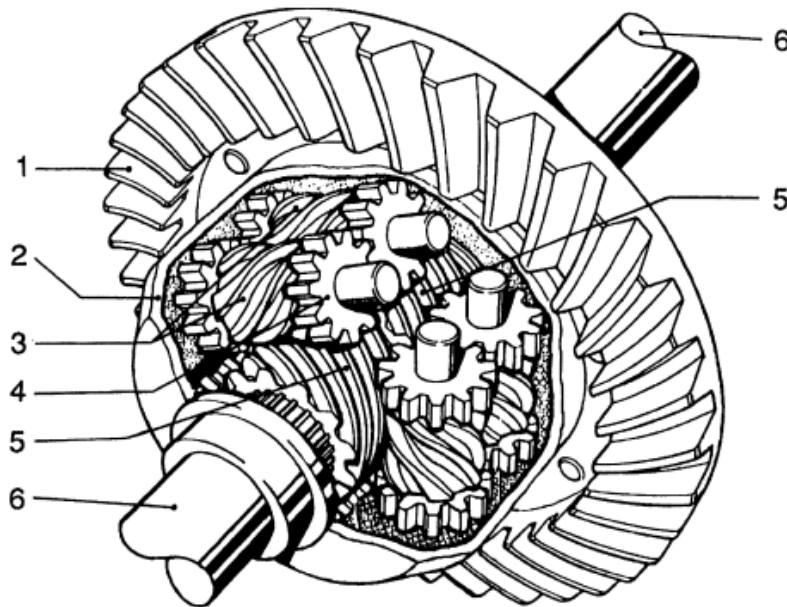
tietenkään ole niin suuria, että tasauspyörästä voitaisiin sanovan olevan kokonaan luokossa, vaan esijännityksen tarkoituksena on auttaa tasauspyörästä välittämään vääntömomenttia toiselta renkaalta tai akselilta toiselle, vaikka renkaiden pito olisi hyvin alhainen (Heisler 2002, s. 238).

Toinen lukittava mekanismi on vetoakselien kartiohammaspyörien ja tasauspyörästä kotelon kartiohammaspyörien kosketuksessa syntyvä voima, joka työntää vetoakselien kartiohammaspyöriä ulospäin. Koska nämä hammaspyörät ovat uritettu vetoakseliin sekä sisäpuolisiin kitkalevyihin, pystyvät ne liikkumaan akselin suunnassa. Kartiohammaspyörät välittävät sitten voiman paineasetelmalle ja edelleen kitkalevyille, jotka rajoittavat akselien välistä pyörintänopeuseroa.

Kolmas kitkalevypakkoja puristava voima syntyy V:n muotoisen syvennyksen ja tasauspyörästä kartiohammaspyörien akselin vuorovaikutuksesta tasauspyörästä kohdistuvan vääntömomentin lisääntyessä. Kun tasauspyörästä kohdistuu vääntömomenttia, vastustaa kartiohammaspyörien akseli pyörimisliikettä verrattuna tasauspyörästä koteloon. Akseli toimii siten ikään kuin kiilana sisemmässä kotelossa olevassa V-syvennyksessä ja aiheuttaa samalla voiman, joka levittää paineasetelmaa samalla puristaen levypakkoja yhteen.

### **2.3.2 Torsen-kierukkavaihteeseen perustuvat tasauspyörästä**

Termi torsen tulee englanninkielisistä sanoista "torque sensitive", jotka vapaasti suomennettuina tarkoittavat vääntömomentille herkkää (Genta & Morello 2009, s. 521). Kuvassa 6 esitetyn rakenteen mukaisessa Torsen-tasauspyörästä voima välittyy tasauspyörästä koteloon (2) lautaspyörän (1) kautta, kuten tasauspyörästä yleensäkin. Kotelosta vääntömomentti välittyy siihen tuettujen akselien kautta kierukkahammaspyörille (3) ja edelleen niiden hammaspyöräpareille (5), jotka ovat yhteydessä uritettuihin vetoakseliin (6). Kierukkahammaspyörät ovat myös yhteydessä toisen akselin kierukkahammaspyöriin suorahampaisten hammaspyörien (4) välityksellä.



**Kuva 6.** Torsen-kierukkavaihteeseen perustuva itselukittuva tasauspyörästö (Genta & Morello 2009, s. 521).

Jotta edellä kuvaillun tapainen tasauspyörästön rakenne olisi toimiva, täytyy kierukkavaihteen hammaspyörien olla hieman normaalista kierukkavaihteesta poikkeavia. Yksi poikkeuksista Torsen-tasauspyörästössä on se, että kierukkavaihteen käytettävä hammaspyörä on suurempi kuin käyttävä hammaspyörä (Heisler 2002, s. 238). Yksi tärkeistä kierukkavaihteen ominaisuuksista tasauspyörästökäyttöä ajatellen on myös se, että vaihteen hammaspyörät ovat leikattu vinohampaisiksi siten, että käytettävä hammaspyörä pystyy pyörittämään käyttävää hammaspyörää mutta ei päinvastoin. Torsen-tasauspyörästön tapauksessa tämä saadaan aikaan antamalla suuremman hammaspyörän hampaille tiheä nousukulma ja pienemmän hammaspyörän hampaille karkea nousukulma.

Kun tasauspyörästöön kytkettyjen vetoakseleiden välillä ei ole nopeuseroa, kuten ajoneuvon kulkiessa suoraan, voima välittyy tasauspyörän koteloon tuettujen kierukkavaihteen akselien kautta kierukkavaihteen hammaspyöräpareille. Tällöin pienempi hammaspyörä kierukkavaihteessa pyörittää suurempaa vetoakseleihin kytkettyä hammaspyörää eikä vetoakseleiden ja tasauspyörästön rungon välillä ole pyörimisnopeuseroa vaan koko tasauspyörästö mekanismeimeen pyörii yhtenä osana (Naunheimer et al. 2011, s. 557; Heisler 2002, s. 239).

Ajoneuvon kääntyessä esimerkiksi mutkassa ajettaessa, mutkan ulkokaaren puolella olevat renkaat kulkevat suurempi säteistä kaarta kuin sisäkaaren puolella olevat renkaat, jolloin niiden välille syntyy pyörimisnopeusero. Tasauspyörästöön kytkettyjen vetoakse-



leiden pyörintänopeudet eroavat tällöin yhtä suuresti tasauspyörästön kotelon pyörimisnopeudesta mutta vastakkaismerkkisesti, eli ulkokaarten puoleisen vetoakselin pyörimisnopeus on saman pyörimisnopeuseron verran nopeampi verrattuna tasauspyörästön koteloon kuin sisäkaarten puoleisen vetoakselin hitaampi. (Heisler 2002, s. 239).

Torsen-tasauspyörästössä tämän nopeuseron kompensointi toimii kierukkavaihteen pienemmän hammaspyörän yhteydessä olevien suorahampaisten hammaspyörien avulla. Tällöin kierukkavaihteet pyörivät yhtä nopeasti mutta vastakkaissuuntaisesti. Mekanismin huonona puolena on kuitenkin tässä tilanteessa syntyvät kitkahäviöt, jotka syntyvät, koska kaikki komponentit pyörivät eri nopeudella toisiinsa nähden, ja ovat samalla kuormituksen alaisena (Naunheimer et al. 2011, s. 557).

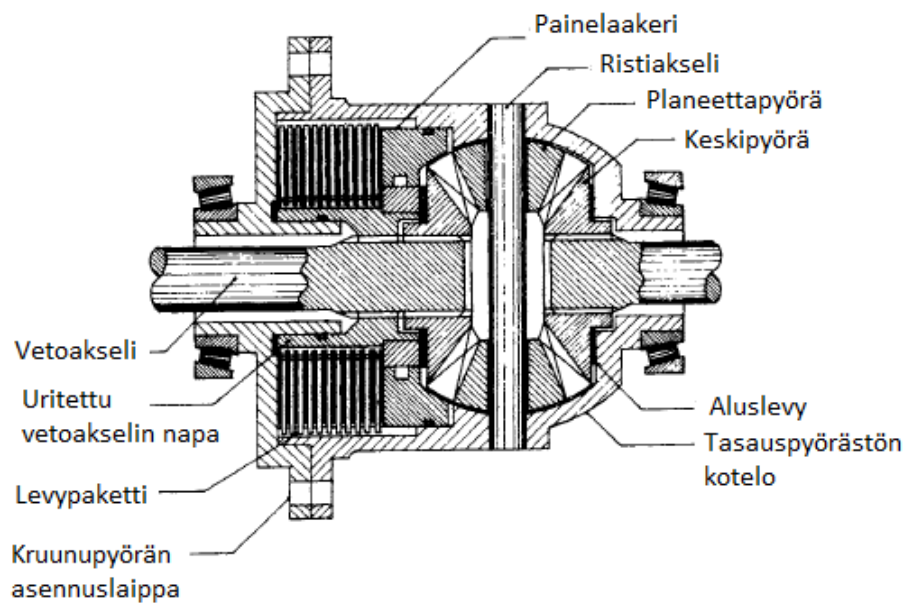
Tasauspyörästötoiminnon lisäksi kierrukkahammaspyörästö toimii myös torsen-tasauspyörästön lukitusmekanismina. Edelläkin mainitulla ”vääntömomentille herkällä” tasauspyörästöllä tarkoitetaan torsen-tasauspyörästön ominaisuutta kertoa saatavilla oleva vääntömomentti lähtevien akseleiden välillä. Tämä vääntömomentin kertomisefekti perustuu kierukkahammaspyörästön käyttävän ja käytettävän hammaspyörän hammaskulmiin (Andreev et al. 2010, s. 408). Tällöin vaihtelevissa pito-olosuhteissa, huonomman pidon omaavalle renkaalle välitetty vääntömomentti kerrotaan tasauspyörästöön suunnitellulla vääntömomenttikertoimella ja välitetään toiselle renkaalle. Henkilöautoissa vääntömomenttikerroin on yleensä 1.8–3.0 (Andreev et al. 2010, s. 411).

Tällaisella vääntömomentin kertomisominaisuudella on myös huonot ominaisuutensa. Esimerkiksi tilanteessa, jossa akselin toinen rengas on ilmassa, ei torsen-tasauspyörästö välitä maassa olevalle renkaalle välttämättä yhtään, tai ainakin riittämättömästi vääntömomenttia ajoneuvon liikuttamiseen, koska ilmassa olevan renkaan pyörittämiseen tarvittava vääntömomentti on hyvin pieni. Käytännössä torsen-tasauspyörästöihin voidaan suunnitella lukituskerrointa esimerkiksi kierukkahammaspyörästön hammaspyörien profiilia muuttamalla hieman yhteensopimattomiksi (Naunheimer et al. 2011, s. 558). Tätä lukituskerrointa lisää myös tasauspyörästössä syntyvät sisäiset kitkat. Lukituskertoimella saadaan siis suunniteltua esijännitystä torsen-tasauspyörästön lukitustoimintaan, jolla edellä kuvattu tilanne voidaan ainakin osaksi ehkäistä.

### **2.3.3 Viskokyttimeen perustuvat itselukittuvat tasauspyörästöt**

Viskokytkin on suljettu sylinterimäinen komponentti, joka sisältää levypaketin sekä korkean viskositeetin omaavan silikoniöljyn. Yleensä viskokyttimeen perustuvat itselukittuvat tasauspyörästöt sisältävät itse viskokyttimeen lisäksi normaalin avoimen tasauspyö-

rästön komponentit (Heisler 2002, s. 241; Naunheimer et al. 2011, s. 558). Viskokytkimellä varustettu tasauspyörästö omaa siis normaalin avoimen tasauspyörästön ominaisuudet, kuten pyörintänopeuskompensoinnin ja tasapuolisen vääntömomentinvälityksen. Ero edellä kuvattuihin itselukittuviin mekanismeihin kuten monilevykytkimeen on kuitenkin siinä, että viskokytkin ei aktivoidu ensisijaisesti mekanismiin kohdistetun vääntömomentin vaikutuksesta vaan viskokytkimen sisältämien levyjen, ja siten vetoakseleiden nopeuseron perusteella. Kuvassa 7 on esitetty tällaisen tasauspyörästön rakenne, jossa viskokytkin on asetettu toisen vetoakselin ja tasauspyörästön kotelon välille.

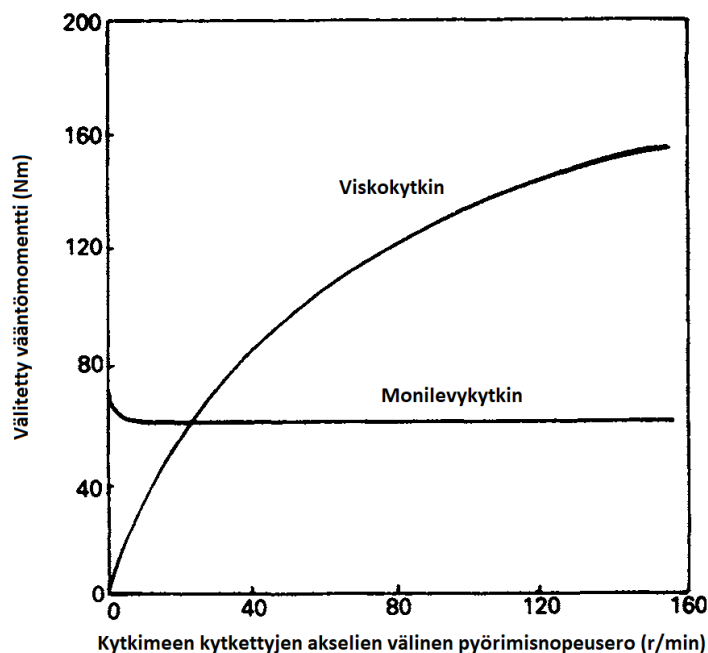


**Kuva 7.** Viskokytkimeen perustuvan itselukittuvan tasauspyörästön rakenne (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 241).

Viskokytkin sisältää rei'itettyjä, tasauspyörästön kuoreen hammastettuja levyjä sekä lovitettuja, toiseen vetoakseliin hammastettuja levyjä (Heisler 2002, s. 241). Levyt ovat erotettu toisistaan 0.25 millimetrin raolla, joka takaa viskokytkimessä käytettävän silikoniöljyn pääsyn levyjen väliin yhdessä levyissä olevien reikien ja lovien kanssa. Tämä on tärkeää, koska viskokytkimen toiminta perustuu juurikin tähän öljyyn ja siihen syntyviin leikkausvoimiin levyjen välissä, kun levyt pyörivät suhteessa toisiinsa. Nämä öljyyn syntyvät leikkausvoimat aiheuttavat pyörimisliikettä vastustavan vääntömomentin. Tämän vääntömomentin suuruus on verrannollinen öljyn viskositeettiin ja pyörimisnopeuseroon levyjen välillä (Heisler 2002, s. 241). Viskokytkimessä käytettävä silikoniöljy on siis suuressa roolissa kytkimen toiminnassa. Tässä käyttökohteessa öljyn täytyy pitää viskositeettinsa tasaisena käyttölämpötila-alueensa läpi sekä odotetun käyttöiän ajan. Käytettävän öljyn kinemaattinen viskositeetti vaihtelee hieman käyttökohteittain ja on yleensä 30 000–100 000 cSt (Genta & Morello 2009, s. 523). Centistoke, lyhennetty cSt, on CGS-

yksikkö (engl. centimetre-gram-second system of units), jota SI-yksiköissä (ransk. Système international d'unités) vastaa  $\text{mm}^2/\text{s}$ .

Tasauspyörästäön toiminta on ajoneuvon kulkiessa suoraan samanlaista kuin monessa edellä kuvatuissa tasauspyörästäöissä; koko tasauspyörästäö pyörii yhtenä kappaleena ja vetoakselien pyörimisnopeudet ovat yhtä suuret (Heisler 2002, s. 242). Ajoneuvon kääntyessä tasauspyörästäö antaa vetoakselien pyöriä eri nopeuksilla tasauspyörästäön koteloon nähden mutta tämä nopeusero välittyy nyt siis myös viskokytkimeen ja sen levyihin, koska osa levyistä on hammastettu tasauspyörästäön koteloon ja osa joko suoraan, tai kartiohammaspyörän kautta vetoakseliin. Tämä aiheuttaa edelleen viskokytkimessä olevaan öljyyn leikkausvoimia ja pyörimisnopeuseroa vastustavaa vääntömomenttia. Pyörimisnopeuserot ajoneuvon kääntyessä eivät kuitenkaan ole suuria, joten suuria leikkausvoimia ja siten levyjen suhteellista pyörimistä vastustava vääntömomentti jää pieneksi.

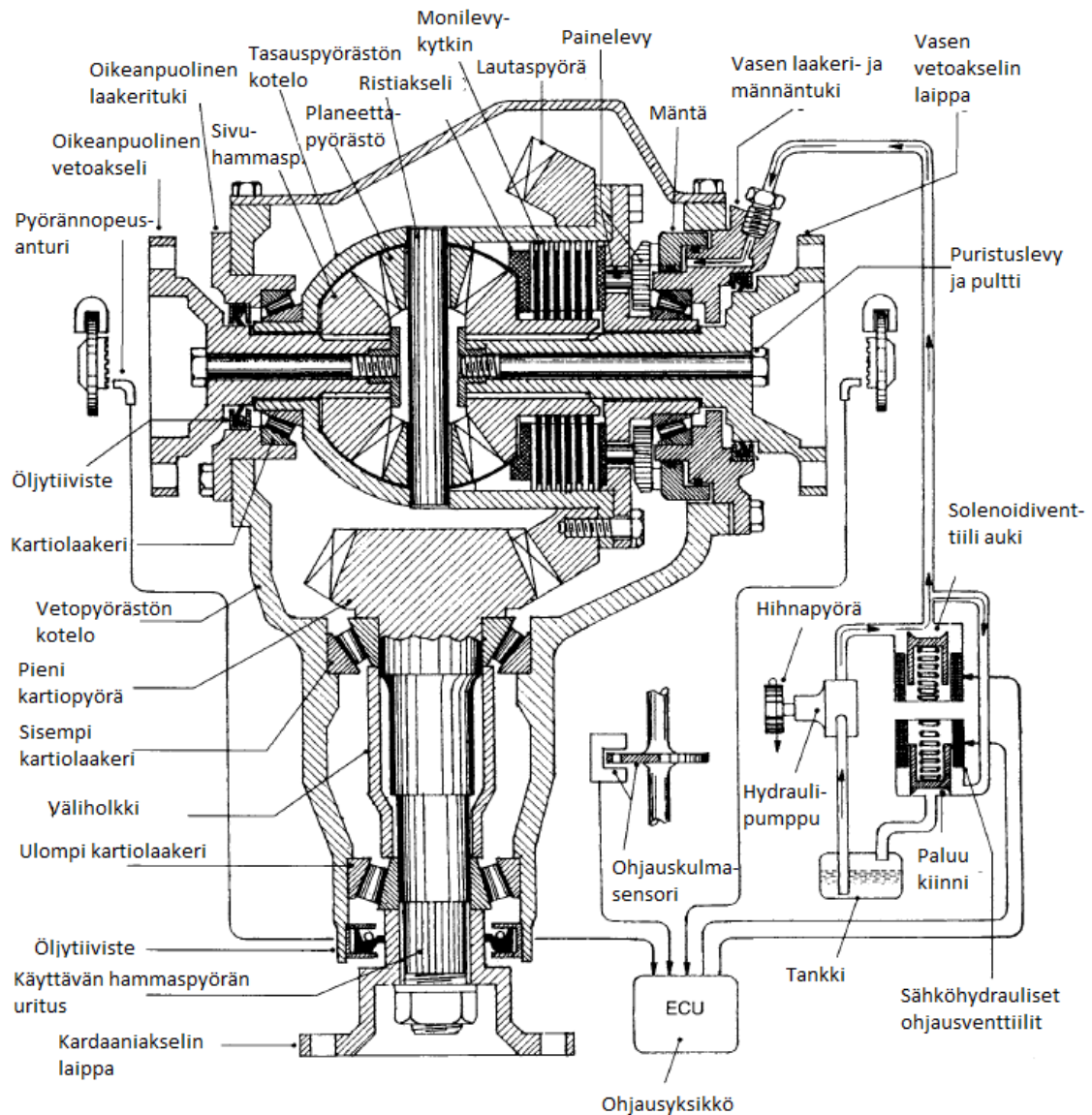


**Kuva 8.** Viskokytimen ja monilevykytkimen välittämä vääntömomentti akselien pyörimisnopeuseron mukaan (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 241).

Tilanteessa, jossa askelin toinen rengas menettää pidon, ovat pyörimisnopeuserot yleensä suurempia. Tällöin myös viskokytimen välittämä vääntömomentti kasvaa. Käyttyminen eroaa siis esimerkiksi monilevykytkimeen perustuvasta lukituksesta merkittävästi. Monilevykytkimen välittämä vääntömomentti ei riipu akselien välisestä pyörimisnopeuserosta vaan vääntömomentti pysyy tasaisena, vaikka pyörimisnopeusero kasvaa. Viskokytimessä välittyvä vääntömomentti taas kasvaa pyörimisnopeuseron mukaan (kuva 8).

## 2.4 Sähköhydrauliset rajoitetun luiston tasauspyörästöt

Sähköhydraulisesti ohjattujen rajoitetun luiston tasauspyörien toiminta muistuttaa hie-  
man luvussa 2.2 käsiteltyjen lukittavien tasauspyörästäöjen toimintaa. Kummassakin lu-  
kitusmekanismi voidaan aktivoida auton ohjausjärjestelmän avulla automaattisesti käyt-  
tämällä esimerkiksi solenoidiventtiilejä, joilla taas ohjataan hydraulinesteen tai ilman pai-  
netta, jolla itse lukitusmekanismia käytetään (kuva 9).



**Kuva 9.** Sähköhydraulisesti toimivan rajoitetun luiston tasauspyörästäön yksityiskohtainen rakenne (perustuu lähteeseen Heisler 2002, s. 263).

Suurimpana erona lukittaviin tasauspyörästöihin kuitenkin on, että lukituksen aktivoiminen ei tarkoita on-off-tyylistä lukitusta. Lukitusta voidaan lisätä tai vähentää teoriassa portaattomasti lisäämällä hydraulipumpun avulla painetta, joka taas lisää voimaa, jolla

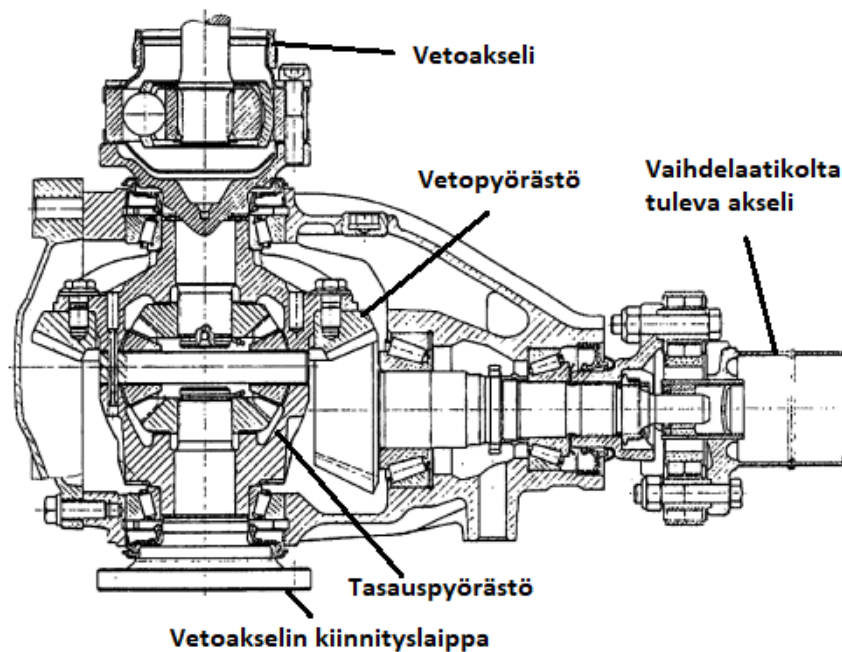
monilevykytkintä puristetaan yhteen. Monilevykytkimellä on kuitenkin jokin maksimivääntömomentin arvo, jota enempää se ei pysty välittämään vetoakselilta toiselle ilman luisumista, vaikka ohjausyksikkö pyytäisikin 100 %:sta lukitusta. Toisaalta monilevykytkimeen on voitu suunnitella esijännitystä, jolloin lukitusta ei voi poistaa kokonaan.

Sähköhydraulisen lukitusmekanismin etuna itselukittuviin mekanismeihin on se, että auton ohjausyksikkö voi sensoridatan perusteella tunnistaa, onko ajoneuvo kaarteessa, jolloin lukitusta vähennetään tai poistetaan kokonaan, jotta lukitusmekanismi ei häiritse kääntymistä. Ohjausyksikkö voi myös renkaiden pyörimisnopeuksien perusteella päätellä, onko jokin renkaista pitonsa rajoilla tai jo pyörimässä tyhjää. Tällöin lukitusta voidaan lisätä ajoneuvon vakauttamiseksi.

### 3. TASAUSPYÖRÄSTÖJEN KÄYTTÖKOHTEET

#### 3.1 Etu- ja takavetoautojen tasauspyörästöt

Kaksivetoisissa henkilöautoissa on nimensä mukaisesti kaksi rengasta, joille voima välitetään. Nämä renkaat sijaitsevat myös siis yhdellä akselilla. Kaksivetoautot voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: etu- sekä takavetoisiin autoihin. Nämä voidaan edelleen jakaa poikittais- sekä pitkittäismoottorisiin. Tässä tekstissä oletetaan autojen olevan etumoottorillisia, jolloin moottori on etuakselilla. Takamoottorillisen auton tapauksessa takaveto toteutettaisiin samankaltaisella rakenteella, kuin etumoottorillisessa autossa etuveto mutta vain taka-akselilla. Takamoottorillinen etuveto taas ei ole järkevä tai edes toteuttamiskelpoinen vaihtoehto. (Naunheimer et al. 2011, s. 140–141)



**Kuva 10.** Erillisjousituksellisen, takavetoisen auton (Mercedes) taka-akselin tasauspyörästön poikkileikkaus (perustuu lähteeseen Genta & Morello 2009, s. 506).

Etumoottorillisessa, takavetoisessa autossa moottori on yleensä orientoitu pitkittäisesti kulkusuuntaan nähden (Naunheimer et al. 2011, s. 142). Tällöin moottorin ja siten myös vaihdelaatikon pyörimisakseli on suunnattuna autossa pitkittäin. Vaihdelaatikon suuntainen akseli käännetään 90 astetta taka-akselin suuntaiseksi vetopyörästön avulla. Vetopyörästön yhteyteen lisätään tasauspyörästö, jotta päästään luvussa 2 mainituista jäykän vetoakselin ongelmista eroon. Tällaista kuvassa 10 esitettyä rakennetta käytetään melkein kaikissa pitkittäismoottorillisissa takavetoisissa autoissa (Naunheimer et al.

2011, s. 555). Kuten nähdään, rakenteeseen ei ole integroitu itselukittuvia mekanisme, kuten monilevykytkintä tai torsen-kierukkavaihdetta vaan tasauspyörästön voidaan sanoa olevan avoin.

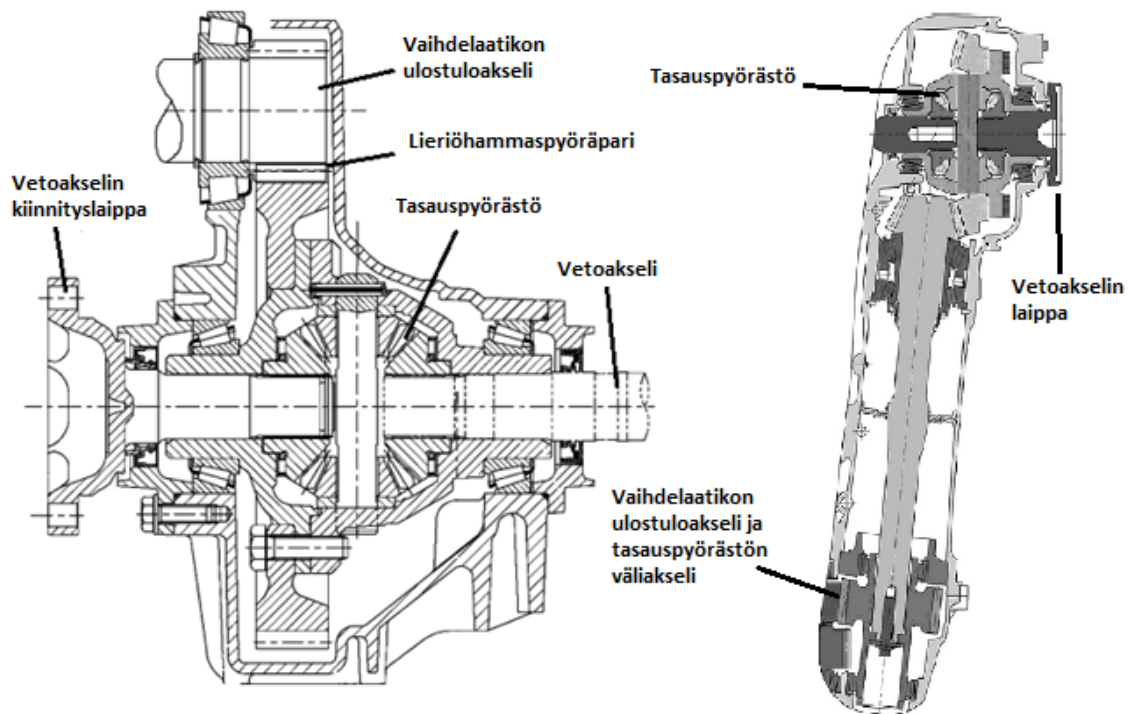
Yksi syy avoimen tasauspyörästön yleisyyteen on se, ettei se vaikuta ajoneuvon ajominaisuuksiin kriittisesti. Monet itselukittuvat tasauspyörästöt vievät ajoneuvon käyttäytymistä aliohjaavammaksi varsinkin hitaissa, jyrkissä mutkissa (Genta & Morello 2009, s. 528). Aliohjauksella tarkoitetaan tilannetta, jossa renkaiden kääntökulma on suurempi kuin ideaalitalanteessa. Ajoneuvon etupää lähtee siis aliohjauksessa liukumaan kohti käännöksen ulkoreunaa.

Tämän lisäksi avoimen tasauspyörästön heikkoutta vaihtelevissa pito-olosuhteissa voidaan korjata modernien ajonvakautus- ja luistonestojärjestelmien avulla. Kun auton ohjausjärjestelmä huomaa muun muassa pyörännopeusantureilta saamansa sensoridatan perusteella, että toinen akselin renkaista pyörii tyhjää, voi se lähettää signaalin, jolla aktivoidaan jarrujärjestelmässä kyseisen renkaan solenoidiventtiili ja välitetään jarrupainetta renkaan jarrusatulalle (Heisler 2002, s. 265). Näin luodaan tyhjää pyörivälle renkaalle ”keinotekoista” vastusta, joka taas antaa tasauspyörästölle mahdollisuuden välittää luodun vastuksen ansiosta kasvaneen vääntömomentin toiselle renkaalle.

Etuvetoisissa autoissa tilanne ei huomattavasti muutu. Myös niissä tasauspyörästöjen itselukittuvat mekanismit tuottavat lisää aliohjautuvuutta. Tämän lisäksi akselille välitetävän vääntömomentin epätasapaino oikean ja vasemman renkaan välillä välittyy huomattavasti voimakkaammin ohjauspyörään. Siksi etuvetoisissa autoissa harvoin käytetään itselukittuvia tasauspyörästöjä poikkeuksena jotkin tapaukset, joissa on käytetty viskokytkintä alhaisella lukituksella. (Genta & Morello 2009, s. 528)

Tasauspyörästön rakenne etuvetoisessa autossa on vain hieman erilainen kuin takavetoisissa. Toimintaperiaatteeltaan molemmat ovat kuitenkin identtiset. Erona voidaan pitää esimerkiksi vääntömomentin välitystapaa tasauspyörästölle: takavetoisissa autoissa vääntömomentti välitetään vetopyörästölle, joka on omassa koteloinnissaan auton takapäässä. Kuten edellä mainittiin, tällä vetopyörästöllä muutetaan vaihdelaatikolta tulevan akselin suuntaa 90 astetta. Etuvetoisissa poikittaismoottorillisissa autoissa taas vaihdelaatikon lähtöakseli on samansuuntainen, kuin renkaiden akseli (kuva 11 vasemmalla). Tällöin myös vetopyörästö yksinkertaistuu, koska voidaan käyttää normaaleja ja yleensä vinohampaisia hammaspyöriä hypoidihammaspyöräparin sijasta. Samalla tasauspyörästökokonaisuus voidaan integroida suoraan vaihdelaatikon yhteyteen. (Genta & Morello 2009, s. 507)





**Kuva 11.** Poikittaismoottorillisen etuvetoauton (FIAT) vaihdelaatikkoon integroidun tasauspyörästä poikkileikkaus vasemmalla ja pitkittäismoottorillisen etuvetoauton (Audi) tasauspyörästäkonfiguraatio oikealla (perustuu lähteeseen Genta & Morello 2009, s. 508).

Pitkittäismoottorillisten etuvetoautojen voimansiirron kokoonpano ei eroa merkittävästi pitkittäismoottorillisesta takavetoautosta. Etuvetoisessa versiossa moottorin vääntömomentti voidaan tuoda vaihdelaatikossa ylimääräisellä, vaihdelaatikon ulostuloakseliin hammastetulla akselilla takaisin kohti ajoneuvon etupäättä, jotta moottori-vaihdelaatikko-yhdistelmä saataisiin aseteltua etuakselin päälle (kuva 11 oikealla).

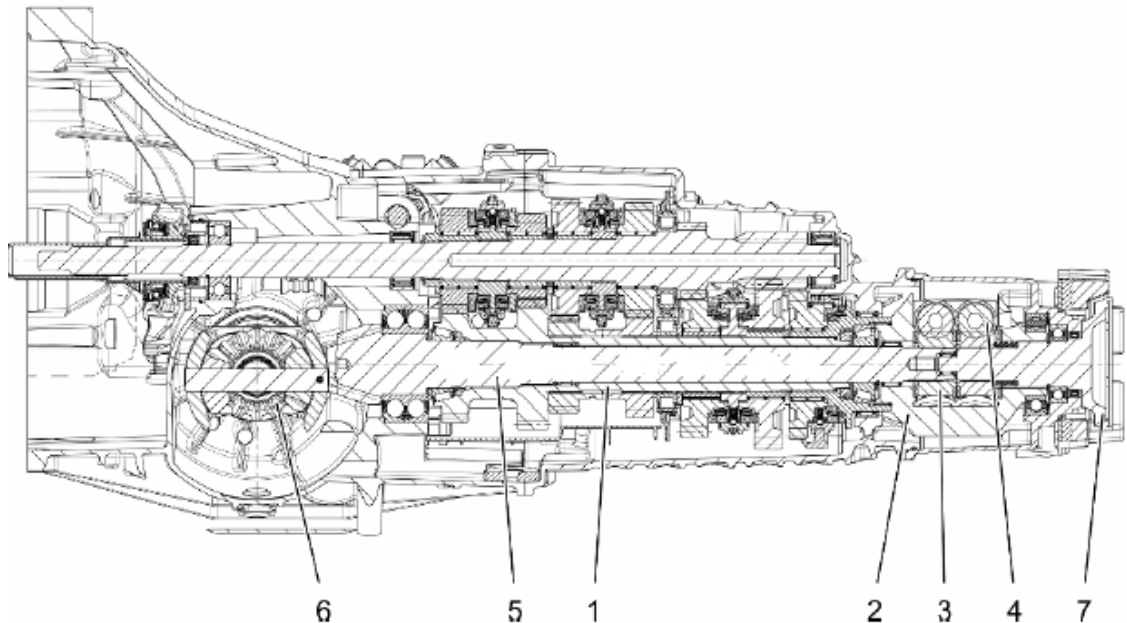
### 3.2 Nelivetoautojen tasauspyörästä

Myös nelivetoautot voivat olla etu- tai takamoottorillisia ja moottori poikittais- tai pitkittäiskonfiguraatiossa. Nelivetoautoissa moottorin kehittämä vääntömomentti välitetään vaihdelaatikon kautta kummallekin etu- sekä taka-akselille. Tämä tuo monimutkaisuutta järjestelmään ja vaatii enemmän komponentteja, koska nelivetoautoissa hyvien ajo-ominaisuuksien säilyttäminen vaatii jopa kolmea tasauspyörästä. Kaksi näistä ovat etu- sekä takatasauspyörästä, jotka hoitavat tasauspyörästätoiminnan akseleiden renkaiden välillä. Kolmas tasauspyörästä tarvitaan akseleiden välille, jotta akselit voivat pyöriä toisiinsa nähden eri pyörintänopeuksilla.

Monet ajoneuvovalmistajat käyttävät jotakin edelläkin esitellyistä itselukittuvista tasauspyörästäistä juurikin akseleiden välisessä tasauspyörästässä. Esimerkiksi Audi on käyt-



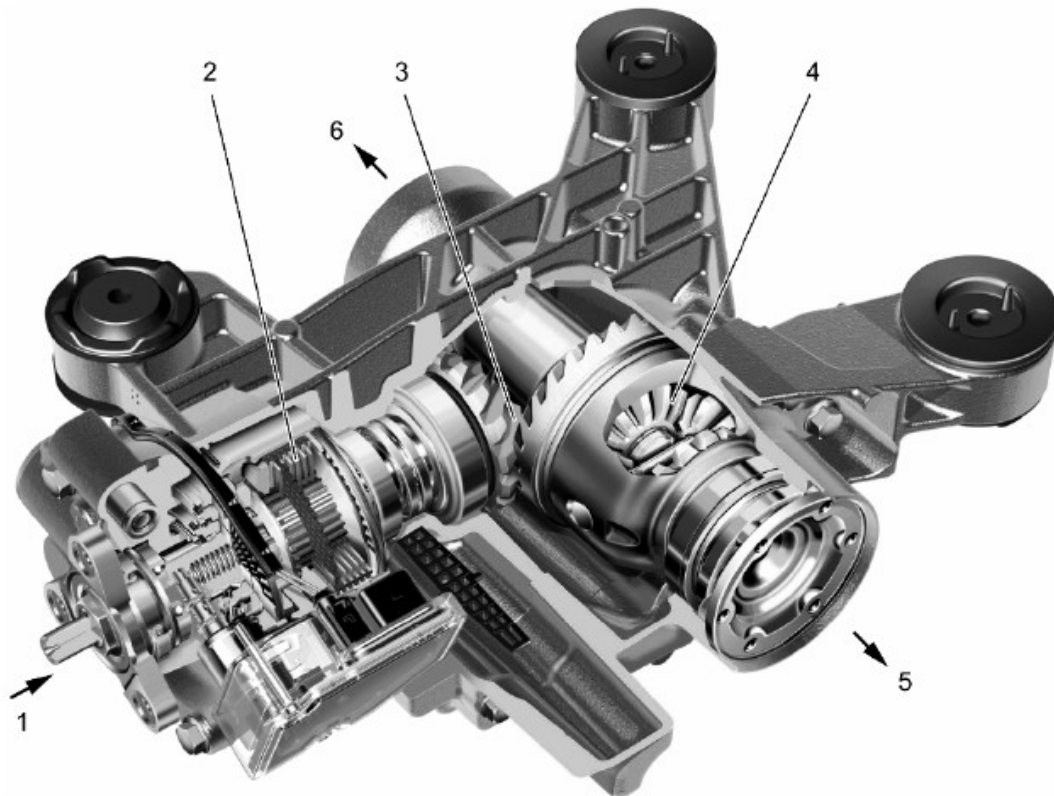
tänyt Torsen-tasauspyörästöä ainakin pitkittäismootorillisissa nelivetoautoissaan vaihdelaatikon päätyyn sijoitettuna kuvan 12 rakenteen mukaan (Naunheimer et al. 2011, s. 562).



**Kuva 12.** Audi Quattro vaihdelaatikko: 1) vaihdelaatikon käytettävä akseli, 2) tasauspyörästön kotelo, 3) planeettapyörä, 4) kierukkapyörä, 5) etuakselin pääakseli, 6) etutasauspyörästö ja 7) taka-akselille menevän akselin laippa (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2011, s. 562).

Audin suunnittelemassa rakenteessa vaihdelaatikon ulostuloakseli (1) on ontto. Sen sisällä kulkee etuakselin pääakseli (5), joka on kytkettynä Torsen-tasauspyörästön puoliskon planeettapyörään (3) ja kiinteästi kytkettynä etutasauspyörästöön (6). Planeettapyöriä käyttävät kierukkapyörät (4), jotka sijaitsevat Torsen-tasauspyörästön kotelossa (2). Taakse vääntömomentti välittyy Torsen-tasauspyörästön toisen puoliskon planeettapyörien välityksellä.

Volkswagenin ratkaisu on käyttää nelivetoisissa autoissaan "4Motion"-järjestelmäänsä, jossa toiminta perustuu sähköhydraulisesti esiohjattuun "märkään" monilevykytkimeen, jota kutsutaan myös Haldex-kytkimeksi. Tällaisessa rakenteessa kytkinpakka ui öljyssä, mutta toisin kuin viskokytkimessä, lukitus ei perustu levyjen välissä olevaan öljyyn ja siihen syntyviin leikkausvoimiin, vaan kytkin kytketään sähköhydraulisesti ohjainyksikön ohjaamana. Haldex-kytkimeen perustuva rakenne on esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13.** Volkswagenin nelivetojärjestelmän, "4Motion":in, rakenne taka-akselilla (Naunheimer et al. 2011, s. 565).

Haldex-kytkin kytkeytyy hydraulisella paineella, joka tuotetaan aksiaalisilla hydraulipumpuilla, jotka toimivat etu- ja taka-akselin välisen pyörimisnopeuseron avulla (Naunheimer et al. 2011, s. 565). Volkswagen on integroinut Haldex-kytkimen (2) osaksi taka-akselistoa. Tässä tapauksessa taka-akselille ei normaalisti välitetä vääntömomenttia vaan taka-akseli kytketään Haldex-kytkimen avulla muuhun voimansiirtoon vain ajonvakautus- tai luistonestojärjestelmän ohjainlaitteen sitä vaatiessa. Yleensä tämä tapahtuu siis ohjainlaitteen havaitessa renkaiden luistamista toisella akselilla. Volkswagenin rakenteessa taka-akselin rakenne sisältää siis etuakselilta vääntömomenttia välittävän akselin (1), Haldex-kytkimen (2), vetopyörästön (3), avoimen tasauspyörästön (4), vasemman vetoakselin laipan (5) ja oikean vetoakselin laipan (6).

Edellä kuvatun laisia rakenteita käytetään, jotta yhden renkaan huono pito estäisi esimerkiksi ajoneuvon liikkeelle lähtöä. Tällaisessa tilanteessa Audin käyttämä Torsen-tasauspyörästö kehittäisi lukitusta etu- ja taka-akseliston välille ja Volkswagenin "4Motion"-järjestelmässä Haldex-kytkintä lukitettaisiin hydraulisen paineen avulla. Kumpikaan näistä rakenteista ei ole kuitenkaan täydellinen. Jos molemmilla akseleilla, eli etu- ja taka-akselilla, on rengas, joka on liukkaalla pinnalla, ei ajoneuvon liikkeelle lähtö ole välttämättä mahdollista. Tässä tapauksessa oletetaan, että etu- ja taka-akselilla olevat tasauspyörästöt ovat avoimia rakenteeltaan.

## 4. TASAUSPYÖRÄSTÖJEN KEHITYSSUUNTIA

Hieman yllättävästi Pecqueurin keksimän tasauspyörästön rakenne on pysynyt samana tähänkin päivään asti. Erityisesti avoin tasauspyörästö on osana melkein jokaisen ajoneuvon voimansiirtoa. Kehitystä on tapahtunut oikeastaan vain elektronisesti esiohjattujen tasauspyörästöjen lukitusmekanismien ja itselukittuvien tasauspyörästöjen kohdalla.

Avointen tasauspyörästöjen suosiolle on muutamiaakin syitä. Yksi näistä on niiden yksinkertainen rakenne, joka pitää valmistuskustannukset alhaisena. Avoimen tasauspyörästön toimintakin on täysin hyväksyttävää normaaleissa ajotilanteissa. Ongelmia esiintyy vain vaihtelevissa pito-olosuhteissa, kuten liukkaalla jää- tai lumipinnalla ajettaessa. Näitäkin ongelmia voidaan ehkäistä käyttämällä aktiivista ajonvakautus- ja luistonestojärjestelmää, joka jarruttaa luistavaa pyörää ja siirtää näin vääntömomenttia toiselle pyörälle. Ajonvakautusjärjestelmät myös tarvitsevat avoimen tasauspyörästön toimintaa esimerkiksi jarruttaessa. Jos tasauspyörästö olisi lukittuna, ei esimerkiksi lukkiutumattomat jarrut, eli ABS (engl. Anti-lock braking system), pystyisi toimimaan suunnitellulla tavalla. ABS-järjestelmän tarkoituksena on täysjarrutuksessa jarruttaa jokaista rengasta erikseen pitonsa rajoilla. Lukittu tasauspyörästö estäisi yksittäisen renkaan jarrutuksen muihin renkaisiin vaikuttamatta.

Tasauspyörästöjen normaaliin rakenteeseen on kuitenkin tutkittu mahdollisia muutoksia ja parannuksia esimerkiksi painon ja koon osalta esimerkiksi Biermann et al. (2013) esittämässä konferenssijulkaisussa. Biermann esittelee tutkimuslaitos FZG Munichin (saks. Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau) vuonna 2002 aloittaman projektin tuloksia. Projektin tarkoituksena oli tutkia ja löytää kevyt sekä kompakti rakenne tasauspyörästölle. Yksi projektin teollisuuspartnereista oli Schaeffler KG, joka aloitti jatkotutkimuksensa projektissa kehitettyjen tasauspyörästöprototyyppien pohjalta.

Schaefflerin jatkotutkimukset johtivatkin uudenlaiseen kevyeen tasauspyörästöön, jonka ideana oli poistaa normaalin tasauspyörästön rakenteesta sisäiset kartiohammaspyörät ja niiden akselit ja korvata ne tavanomaisella planeettapyörästöllä. Schaeffler valitsi kehityskohteekseen Volkswagenin tasauspyörästön, jota käytetään MQ350-mallinimisessä 6-vaihteisessa manuaalivaihdelaatikossa. Tasauspyörästöön välittyvä teoreettinen maksimi vääntömomentti on 5500 Nm. Tarkoituksena oli siis suunnitella kevyempi tasauspyörästö, joka kestäisi kyseisen akselimomentin ja voitaisiin asentaa suoraan Volkswagenin oman tasauspyörästön tilalle. Kehityksen tuloksena saatiin muun muassa kuvassa

14 esitetyn mukainen rakenne, joka käyttää suorahampaisia hammaspyöriä. (Biermann et al. 2013)



**Kuva 14.** Schaefflerin kehittämän kevyen tasauspyörästäön variantti suorahampaisilla hammaspyörillä (Biermann et al. 2013, s. 211).

Schaeffler-tasauspyörästäö sisältää käytännössä kaksi planeettapyörästäötä. Molemmille vetoakseleille on omat keskipyöränsä, joiden ulkokehille on sijoitettu kolme paria planeettapyöriä. Planeettapyöräpareissa toinen hammaspyöristä on hammaskosketuksessa molempien keskipyörärien kanssa ja toinen vain vasemman tai oikean keskipyörän kanssa. Verrattuna Volkswagenin omaan tasauspyörästäöön, Schaefflerin kevyen rakenteen variantissa, joka on suunniteltu kestävänsä 5500 Nm vääntömomentin, säästetään massassa 33 % (8,95 kg vastaan 6.01 kg) ja laakerivälissä jopa 75% (128 mm vastaan 32.6 mm). Kun välitettävä vääntömomentti on 8000 Nm, säästetään vieläkin 11 % (8,95 kg vastaan 8,0 kg) massassa ja 56 % (128 mm vastaan 56 mm) laakerivälissä.

Tulokset ovat rohkaisevia ja lupaavat suuria säästöjä niin massassa kuin laakerivälissä. Massan pienentyminen vaikuttaa suoraan energiasäästöihin positiivisesti ja laakeriväli tasauspyörästäön vaatimaan tilaan. Pienentynyt tilan tarve mahdollistaa myös uusien ominaisuuksien tai toiminnallisuuksien lisäämisen (Biermann et al. 2013, s. 214). Schaeffler on tutkinut myös vinohampaista versiota tasauspyörästäöstään. Vinohampaiden hammaspyörärien hampaiden vinouskulmalla voidaan saada aikaan myös lukitusvaikutusta, joka muistuttaa toiminnallaan hieman Torsen-tasauspyörästäötä. Lukitusvaikutusta voidaan lisätä myös lisäämällä kitkalevyjä planeettapyörärien ja koteloinnin väliin.

Schaeffler-tasauspyörästö tuo selviä etuja normaaliin tasauspyörästöön verrattuna, mutta esimerkiksi komponenttien määrä on korkeampi. Toisaalta suorahampaisten hammaspyörien käyttö saattaa nostaa melun määrää. Biermann et al. (2013) esittää melutason olevan jopa 10 dB alhaisempi, kuin vastaavalla kartiohammaspyöriä käyttävällä tasauspyörästöllä. Tämä tulos kuitenkin koski vain tasauspyörästöön yhdistettyä vetopyörästöä.

## 5. YHTEENVETO

Ajoneuvoteknologia on kehittynyt nopeasti aina höyrykonevoimaisen ajoneuvon keksimisestä asti 1800-luvun alusta. Tällöin myös tarve tasauspyörästä tuli ilmi, ja vuonna 1827 Onésiphore Pecqueurin keksimänä ensimmäinen tasauspyörästä sai rakenteensa. Tasauspyörästä on siitä lähtien pitänyt toimintaperiaatteensa käytännössä identtisenä, eikä tähän ole nähtävissä suuria muutoksia lähitulevaisuudessa.

Pecqueurin keksimää tasauspyörästä voidaan kutsua myös avoimeksi tasauspyörästäksi. Avoin tasauspyörästä mahdollistaa akselin renkaiden pyörivän eri pyörimisnopeuksilla esimerkiksi ajoneuvon kulkiessa kaarteessa ja samalla se jakaa tulevan vääntömomentin tasan molemmille ulostuloakseleille. Avoin tasauspyörästä omaa kuitenkin joitakin haitallisia ominaisuuksia. Yksi näistä on sen käyttäytyminen vaihtelevissa pito-olosuhteissa, jolloin avoimen tasauspyörästäön ominaisuus välittää vääntömomenttia aina tasaisesti akseleiden välillä aiheuttaa tilanteen, jossa tasauspyörästä välittää pienimmän vaaditun vääntömomentin renkaiden pyörittämiseen molemmille renkailla. Tällöin toisen renkaan ollessa liukkaalla pinnalla, saattaa tasauspyörästäön toiminta estää ajoneuvon liikkeelle lähdön.

Tämä ongelma voidaan ratkaista käyttämällä esimerkiksi lukittavaa tasauspyörästä, jolloin tasauspyörästä on lukittavissa siten, että molemmat ulostuloakselit ovat kytkettynä toisiinsa. Muitakin ratkaisuja on, kuten itselukittavien tasauspyörästäjen käyttäminen. Itselukittuvat tasauspyörästä voidaan jakaa vääntömomentin avulla lukittuviin ja pyörimisnopeuseron avulla lukittuviin. Vääntömomentilla lukittuvia ovat esimerkiksi Torsen-tasauspyörästä ja nopeuserolla lukittuvia viskokyttimeen perustuvat tasauspyörästä. Lukitusta voidaan myös ohjata esimerkiksi sähköhydraulisesti, kuten Haldex-kytkimellä, jolloin lukituksen määrää voidaan vaihtaa ajotilanteen mukaan automaattisesti.

Ajoneuvovalmistajat suosivat avoimen tasauspyörästäön käyttöä omissa voimansiirroissaan sen yksinkertaisuuden ja kustannustehokkuuden vuoksi. Sen toiminta on myös suotuisaa nykyisiä ajonvakautus- ja luistonesto- ja ABS-järjestelmiä ajatellen. Lukittavia ja itselukittuvia tasauspyörästäjä käytetään yleensä nelivetoisissa ajoneuvoissa keskitasauspyörästäön yhteydessä, kuten Audi Torsen-tasauspyörästä ja Volkswagen Haldex-kytkintä.

Tasauspyörästäön rakenne on pysynyt siis hyvin pitkään samana. Joitakin prototyyppejä on kehitetty, kuten Schaeffler KG:n kehittämä kevyt tasauspyörästä, jossa normaalin ta-

saussyörästön sisäiset kartiohammaspyörät ovat korvattu planeettapyörästöllä. Tällaisella rakenteella on saatu suuriakin parannuksia esimerkiksi tassyussyörästön massan ja laakerivälin osalta. Toisaalta käyttämällä Schaeffler-tassyussyörästön rakennetta, voidaan maksimi vääntömomenttia kasvattaa lisäämättä tassyussyörästön massaa ja suurentamatta laakeriväliä verrattuna normaaliin tassyussyörästöön. Tällä hetkellä ei kuitenkaan näytä siltä, että Schaeffler-tassyussyörästö olisi syrjäyttämässä normaalia avointa tassyussyörästöä ajoneuvojen voimansiirroissa.

# LÄHTEET

Andreev, A.F., Kabanau, V. & Vantsevich, V. (2010). Limited Slip Differentials, in: Driveline Systems of Ground Vehicles: Theory and Design, 1st ed., CRC Press, Boca Raton Florida, USA, pp. 379–452. Saatavissa: <https://doi.org/10.1201/EBK1439817278>.

Biermann, T., Chang, X. & Höhn, B.R. , (2013). Schaeffler Lightweight Differentials, in: SAE-China (ed.), Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 199–214. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33744-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33744-4_18).

Genta, G. & Morello, L. (2009). Differentials and Final Drives, in: The Automotive Chassis: Vol. 1: Components Design, 1st ed., Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 505–531. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8676-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8676-2_13).

Heisler, H. (2002). 7 - Final drive transmission, in: Advanced Vehicle Technology, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 226–269. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-075065131-8/50008-7>.

Mihailidis, A. & Nerantzis, I. , (2013). Recent Developments in Automotive Differential Design, in: Dobre, G. (ed.), Power Transmissions, Springer Dordrecht, June 20-23, 2012, Netherlands, pp. 125–140. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6558-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6558-0_8).

Naunheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J. & Novak, W. (2011). Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application, 2nd ed., Springer, Berlin, Germany, 717 p. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16214-5>.